

УДК 66.012.45

doi: 10.20998/2220-4784.2018.40.06

*Т. Г. БАБАК, С. Н. БЫКАНОВ, Л. В. СОЛОВЕЙ, В. А. УС***ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ВЫПАРИВАНИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА ГИДРОКСИДА НАТРИЯ**

В статье предлагается проект модернизации трехкорпусной установки выпаривания водного раствора гидроксида натрия с целью повышения его концентрации. Модернизация состоит в создании сети теплообменного оборудования, реализующей рекуперацию тепла технологических потоков выпарной установки. Проектирование было проведено с помощью методов пинч-анализа, а именно, был обоснован выбор минимальной разности температур в теплообменном оборудовании ΔT_{\min} , создан проект сети теплообменников, реализующей минимальное потребление внешних утилит, и проведена оптимизация сети. В качестве теплообменного оборудования были предложены и рассчитаны современные пластинчатые теплообменные аппараты. Проведена экономическая оценка проекта, показывающая, что срок его окупаемости составит около двух месяцев.

Ключевые слова: гидроксид натрия, выпарная установка, рекуперация энергии, пинч-анализ, пластинчатые теплообменники.

*Т. Г. БАБАК, С. М. БИКАНОВ, Л. В. СОЛОВЕЙ, В. А. УС***ОПТИМІЗАЦІЯ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОНОСІВ У ПРОЦЕСІ ВИПАРЮВАННЯ ВОДНОГО РОЗЧИНУ ГІДРОКСИДУ НАТРІЯ**

В статті пропонується проект модернізації трикорпусної установки випарювання водного розчину гідроксиду натрію з метою підвищення його концентрації. Модернізація полягає в створенні мережі теплообмінного обладнання, що реалізує рекуперацію тепла технологічних потоків випарної установки. Проектування було проведено за допомогою методів пінч-аналізу, тобто було обґрунтовано вибір мінімальної різниці температур в теплообмінному обладнанні ΔT_{\min} , утворено проект мережі теплообмінників, що реалізує мінімальне споживання зовнішніх утиліт і проведено оптимізацію мережі. В якості теплообмінного обладнання було запропоновано і розраховано сучасні пластинчаті теплообмінні апарати. Було проведено економічну оцінку проекту, що показала термін його окупності складе приблизно два місяці.

Ключові слова: гідроксид натрію, випарна установка, рекуперація енергії, пінч-аналіз, пластинчаті теплообмінники.

*T. G. BABAK, S. M. BYKANOV, L. V. SOLOVEY, V. A. US***OPTIMIZATION OF ENERGY UTILITIES CONSUMPTION IN THE AQUEOUS SODIUM HYDROXIDE SOLUTION EVAPORATION**

The paper proposes the retrofit design of a three-unit evaporator for evaporating of aqueous sodium hydroxide solution in order to increase its concentration. The retrofit assumes the creation of a heat exchange equipment network that has to implement heat recovery of the process streams of the evaporator. The design was carried out with the pinch-analysis methods. The threshold problem (demand for hot utilities only) was identified by shifting the composite curves and the threshold temperature difference $11,7^{\circ}\text{C}$ was found. Problem definition, like a pinch problem, was made with the choice of minimum temperature difference $\Delta T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$ in heat exchange equipment. The design of the heat exchangers network that realizes the minimum consumption of external utilities and maximum energy recovery was created, and the network optimization with energy relaxation was carried out. Modern plate heat exchangers as heat exchange equipment were chosen and calculated. The economic evaluation of the design was conducted. The payback period will be about two months.

Keywords: sodium hydroxide, evaporator, energy recovery, pinch analysis, plate heat exchangers.

Введение. Исследования, направленные на усовершенствование тепловой схемы процесса выпаривания, и использованию разных типов оборудования, подразумевают, прежде всего, снижение потребления внешней энергии. Решение задачи модернизации тепловой схемы выпарной установки, с целью повышения эффективности работы, является актуальной, и имеет практическую ценность. Выпаривание в многокорпусной выпарке, несмотря на многократное использование исходного пара, является, наиболее энергетически затратным в технологических процессах химической и пищевой промышленности. Поэтому имеются многочисленные исследования, направленные на снижение расхода энергии и повышение уровня рекуперации, что особенно важно, как с точки зрения снижения себестоимости выпускаемой продукции, так и с точки зрения уменьшения выбросов и экологической безопасности. Важнейшим резервом увеличения экономической эффективности процесса выпаривания является не только совершенствование самих выпарных аппаратов, применение

термосифонных установок, но и, прежде всего, оптимальное или рациональное использование вторичных паров и конденсатов различных корпусов для предварительного подогрева исходного продукта. Проектирование системы подогревателей требует анализа тепловой схемы с помощью математических методов.

Одним из наиболее эффективных и универсальных подходов к исследованию тепловой схемы выпарных установок с целью рекуперации тепла, зарекомендовал себя пинч-анализ. Использованию методов пинч-анализа посвящено большое количество исследований, среди которых можно выделить практические приложения в работах [1–3]. В этих работах предложена конкретная модернизация выпарных установок различных производств, полученная на основе повышения рекуперации тепловых потоков. Задача решается с использованием методов пинч-анализа, выбором и размещением теплообменного оборудования.

© Бабак Т.Г., Биканов С.М., Соловей Л.В., Ус В.А., 2018

Анализ экономической эффективности показал высокую степень экономии внешних утилит и вполне приемлемый для практики срок окупаемости проекта.

Описание выпарной установки и выбор технологических потоков для рекуперации тепла. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

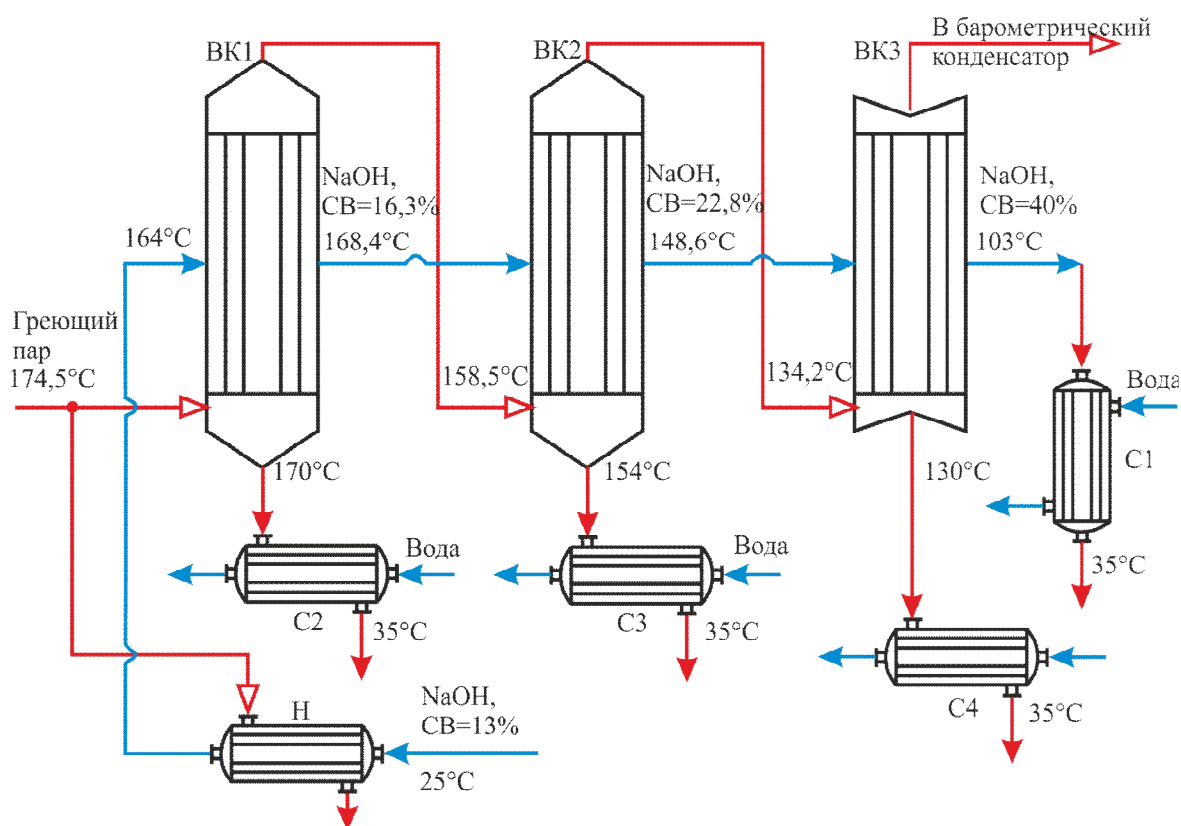


Рис. 1 – Принципиальная технологическая схема установки выпаривания водного раствора NaOH

Водный раствор с концентрацией едкого натра (NaOH) 13%, имеющий температуру 25 °С, подогревается в паровом нагревателе Н и подается в первый корпус выпарной установки при температуре близкой к температуре кипения 164 °С. Выпаривание в первом корпусе осуществляется паром из котельной, во втором и третьем – вторичными парами предыдущих корпусов. Конденсат паров выпарных корпусов охлаждается в теплообменниках C2, C3, C4 и направляется в емкости сбора конденсата. Конечный продукт с концентрацией NaOH 40% охлаждается до температуры 35 °С в охладителе C1.

В качестве теплообменного оборудования используются кожухотрубчатые теплообменные аппараты. Рекуперация тепла в системе подогрева и охлаждения отсутствует.

Анализ данных существующей схемы, расчет материального и теплового баланса, позволяет выделить технологические потоки для проведения реконструкции. Данные потоков приведены в табл. 1. Отметим, что было принято решения объединения потоков конденсата из выпарных корпусов в один технологический поток. Также был добавлен поток технической воды для нужд производства.

Таблица 1 – Данные технологических потоков выпарной установки для интеграции

№	Название потока	Тип	G , кг/с	T_s , °С	T_l , °С	c , кДж/(кг·°С)	CP , кВт/°С	ΔH , кВт
1	Смесь конденсатов	гор	2,629	151,8	35	4,207	11,06	1291,83
2	Раствор NaOH 40%	гор	1,26	103	35	3,25	4,095	278,48
3	Раствор NaOH 13%	гор	3,89	25	164	3,651	14,202	1974,13
4	Техническая вода	хол	0,61	15	50	4,19	2,556	89,46

Постановка задачи и выбор подхода к решению. Для выбора подхода к созданию проекта модернизации системы теплообмена были построены составные кривые технологических потоков процесса и рассмотрены их относительное положение на

температурно-энтальпийной диаграмме для различных значений ΔT_{min} . Это исследование показало, что данная проблема представляет собой пороговую задачу [4, 5].

На рис.2 представлены составные кривые тепловых потоков процесса, расположенные таким образом, что охлаждение горячих потоков не требуется, а к холодным потокам необходимо подвести тепло мощностью 493,27 кВт.

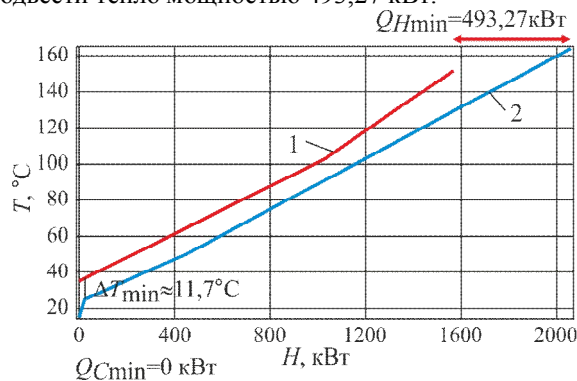


Рис. 2 – Составные кривые потоков процесса:
1 – горячих, 2 – холодных

Зависимость требуемой мощности внешних утилит от величины ΔT_{\min} изображена на рис. 3. Изменение характера зависимости соответствует пороговому значению $\Delta T_{\text{пор}} = 11,68655^\circ\text{C}$.

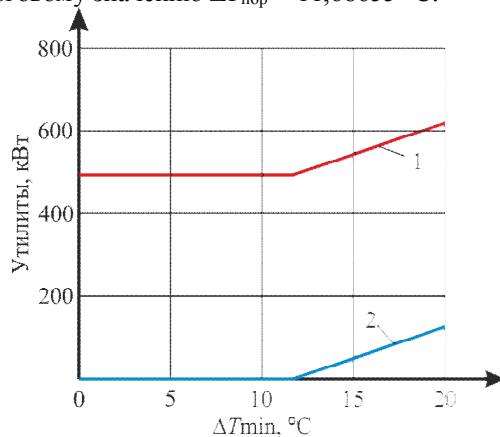


Рис. 3 – Зависимость мощности внешних утилит от ΔT_{\min} : 1 – горячих, 2 – холодных

Для пороговых задач характерно, что при значениях ΔT_{\min} , менее чем $\Delta T_{\text{пор}}$, значение требуемой мощности одной из внешних утилит, $Q_{H\min}$ либо $Q_{C\min}$, равно нулю, а значение другой остается постоянной. При этом требуется либо нагрев, либо охлаждение одновременно в области ниже и выше пинча, что противоречит правилам пинч-анализа. Отсюда следует вывод, что использование значений $\Delta T_{\min} < \Delta T_{\text{пор}}$ не рационально, так как не приводит к уменьшению затрат на внешние утилиты, а только повышает капитальные затраты.

Выбор $\Delta T_{\min} > \Delta T_{\text{пор}}$ сводит пороговую задачу к стандартной пинч-проблеме.

Если составные кривые расположены так, что на одном конце составных кривых, горячем либо холодном, не требуется использование внешних утилит, мы можем получить задачи двух типов.

Исходя из того, что линия пинча делит тепловую систему потоков на две – одна из которых является источником тепловой энергии, а другая стоком – пинч находится на том конце составных кривых, где не требуются внешние утилиты. Задача первого типа характеризуется тем, что минимальная температурная разность между составными кривыми соответствует точке пинча, при этом задача проектирования теплообменной сети по сути сводится к использованию правил размещения теплообменного оборудования выше или ниже пинча. Если же составные кривые имеют максимальное сближение в некоторой точке внутри составных кривых (задача второго типа), то требуется иной подход. При этом выбирается близкое к $\Delta T_{\text{пор}}$ значение ΔT_{\min} , меньше, чем $\Delta T_{\text{пор}}$. Составные кривые процесса располагаются друг относительно друга в соответствии с выбранным значением ΔT_{\min} . Точку их максимального сближения называют псевдо-пинч.

Размещение теплообменников в области нулевого потребления внешних утилит производится как от точки псевдо-пинча, так и от конца, на который наложено ограничение [5]. Поскольку в этой области тепловые потоки не находятся в строгом тепловом балансе. Это приводит к передаче небольшого количества тепловой энергии через псевдо-пинч.

Как видно из рис. 2, данная задача относится ко второму типу, когда максимальное сближение составных кривых по температурной оси, равное $\Delta T_{\text{пор}}$, соответствует внутренним точкам составных кривых.

Учитывая то, что рекомендованное по данной отрасли производства значение ΔT_{\min} в используемом теплообменном оборудовании находится в пределах $10\text{--}20^\circ\text{C}$ [6], было принято решение о выборе $\Delta T_{\min} = 12^\circ\text{C}$, что позволяет рассматривать данную задачу как классическую пинч-проблему и избежать наложения жесткого ограничения на неиспользование холодных утилит.

Проектирование сети с минимальным потреблением внешних утилит и ее оптимизация.

Для выбранного значения $\Delta T_{\min} = 12^\circ\text{C}$ были определены целевые значения мощности внешних утилит: $Q_{H\min} = 498,02$ кВт, $Q_{C\min} = 4,75$ кВт. Мощность рекуперации составила 1570,3 кВт.

На рис. 4 представлена сеточная диаграмма с размещенными теплообменниками, обеспечивающими минимальное потребление внешних утилит. При проектировании производилось расщепление потока сырья и потока конечного продукта. Следует отметить, нагрузка теплообменника T5 существенно меньше нагрузки остальных теплообменников, что дает основания для оптимизации сети теплообменников, состоящей в удалении теплообменника T5 и увеличении мощности потребляемых внешних утилит.

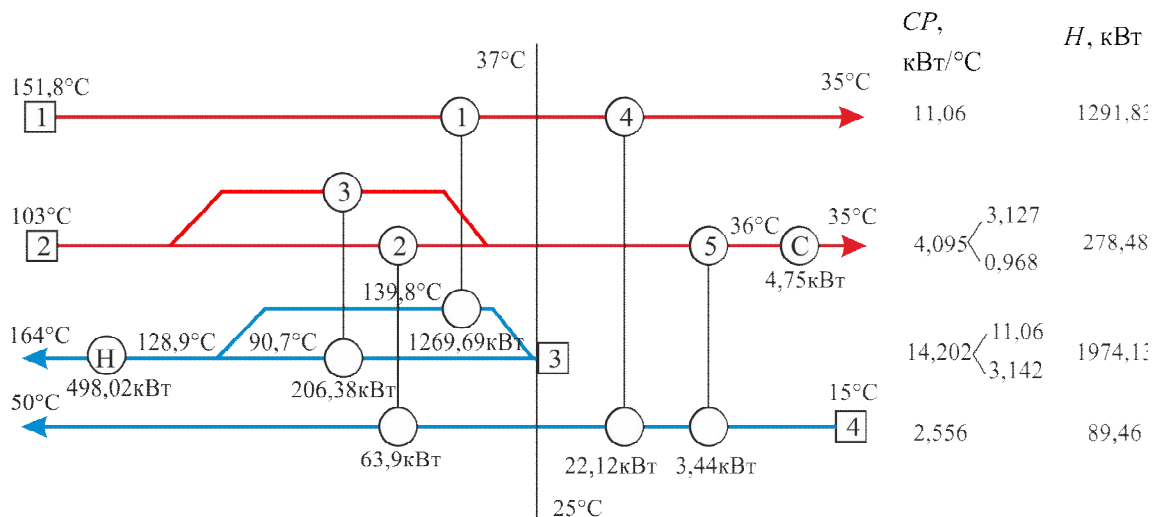


Рис. 4 – Сеточная диаграмма сети с минимальной мощностью внешних утилит

На рис. 5 представлена сеточная диаграмма теплообменной сети, из которой был удален теплообменник Т5 с нагрузкой 3,44 кВт. Это привело к тому, что нагрузка охладителя возрастает до 8,19 кВт. Температура потока 4 – технической воды –

на горячем конце теплообменника Т4 равна 23,7 °C, что меньше температуры пинча холодных потоков. Это значит, что не происходит нарушения $\Delta T_{\min} = 12$ °C.

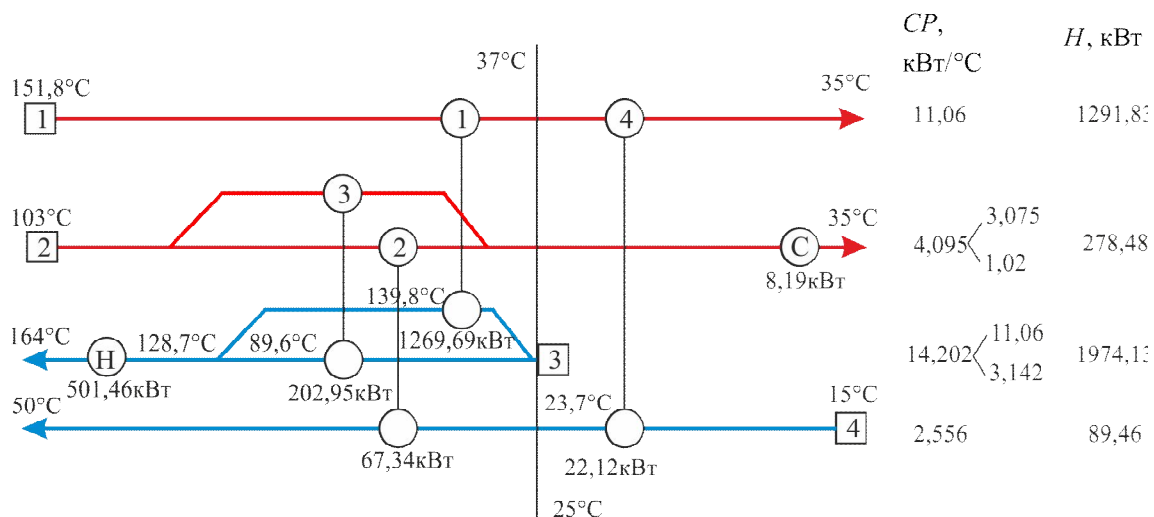


Рис. 5 – Оптимизированная сеть теплообменников с передачей тепла через пинч

Выше пинча, чтобы не добавлять еще один нагреватель на потоке 4, увеличена нагрузка теплообменника Т2 с 63,9 кВт до 67,34 кВт. В этом теплообменнике горячим теплоносителем является поток 2 – конечный продукт. Поток 2 был расщеплен, поэтому мы получили возможность изменять соотношение потоковых теплоемкостей, а значит и нагрузки теплообменников, установленных на обеих ветвях, не нарушая температуру потока 2 на входе в пинч. Таким образом, получено изменение нагрузки на теплообменнике Т3 с 206,38 кВт на 202,95 кВт. В результате понижается температура на горячем конце теплообменника Т3 одной из ветвей потока 3 и температура на входе в нагреватель. Потребление горячих утилит теперь составляет 501,46 кВт, то есть увеличивается на величину мощности исключенного

из схемы теплообменника Т5 из-за переноса тепла через пинч. Суммарная мощность рекуперации составляет 1562,2 кВт.

Подбор теплообменного оборудования и формирование модернизированной схемы. В качестве теплообменного оборудования были выбраны пластинчатые теплообменные аппараты, реализующие высокий коэффициент теплопередачи и имеющие компактные размеры. К их достоинствам надо отнести также простоту в обслуживании.

При анализе сеточной диаграммы было принято решение отказаться от охладителя, поскольку целевая температура продукта несущественно отличается от достигнутой температуры в результате теплообмена – 37 °C.

Выбор пластинчатых теплообменников осуществлялся из ассортимента, выпускаемого фирмой Alfa Laval, и их расчет проведен в программе CAS 2000. Номенклатура выбранного теплообменного оборудования приведена в табл. 2.

В результате была сформирована принципиальная технологическая схема реконструированной установки концентрирования NaOH.

Таблица 2 – Параметры теплообменного оборудования

Теплообменник	Тип	Число пластин	Компоновка	Площадь поверхности, м²	Цена, грн (без НДС)
T1	TL10P	45	2-11H+2-11H	22, 5	414513
T2	TL3B	18	1-8MH / 1-9ML	1,341	51843
T3	TL6B	27	1-(10H+3ML) / 1-(10H+3MH)	6,385	138765
T4	M3	46	1-23L / 1-22L	1,472	63360
H	CB77	40	1-19LW / 1-20LG	4	69828

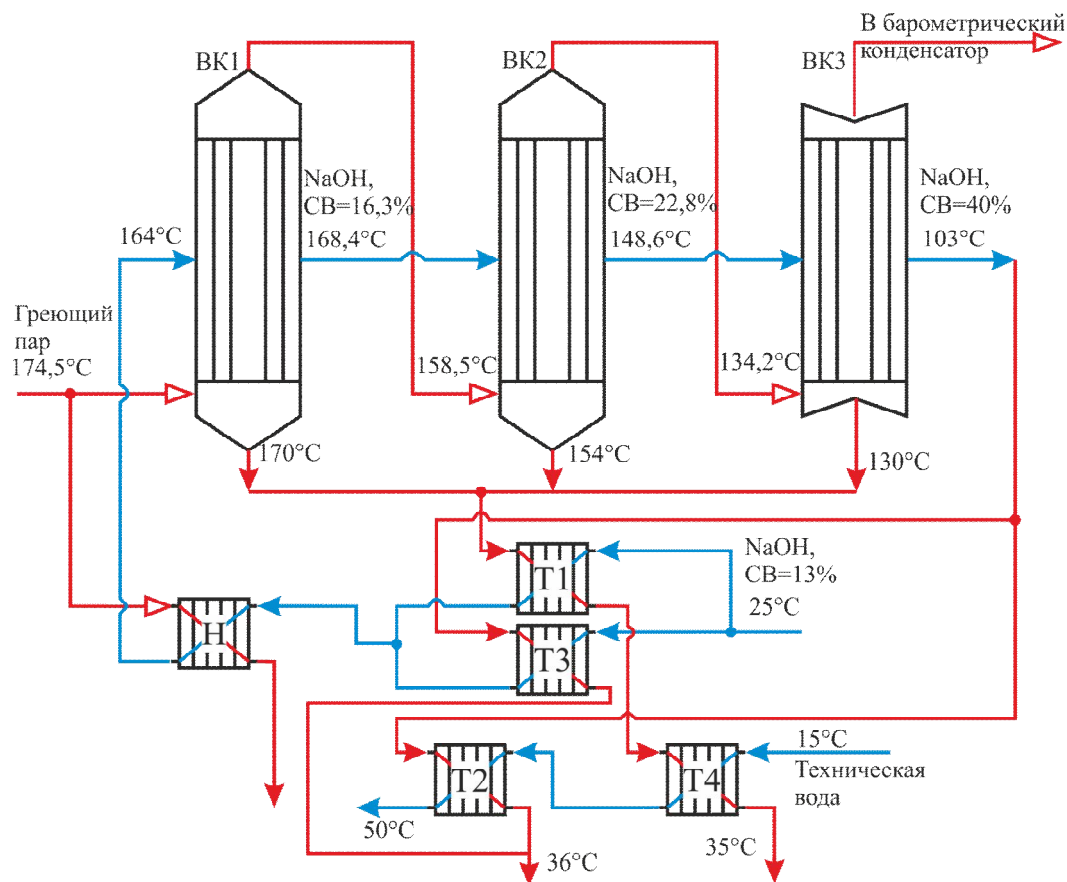


Рис. 5 – Принципиальная технологическая схема после реконструкции

Экономическая оценка проекта модернизации. Предлагаемый проект модернизации позволяет осуществить экономию мощности потребляемого пара на 1562,2 кВт, холодной воды – на 1570,3 кВт. При цене на газ для промышленности 12249,6 грн за 1000 м³ [7] экономия на стоимости внешних утилит составит 13 578 820 грн в год. Капитальные затраты составят 1 477 356 грн.

Таким образом, будет получена эффективность капитальных вложений 7,3 грн/грн. Расчетный срок окупаемости проекта около 2 месяцев.

Выводы.

1. Анализ составных кривых технологических потоков процесса и их относительное положение на температурно-энтальпийной диаграмме для различных значений ΔT_{\min} показал, что для $\Delta T_{\min} < 11,7^\circ\text{C}$ мощность потребляемых внешних утилит остается постоянной, то есть сформулированная проблема представляет собой пороговую задачу;
2. С учетом локализации места наибольшего сближения составных кривых на температурно-

энтальпийной диаграмме по оси температур при отсутствии необходимости в холодных утилитах – охлаждающей воды, был выбран подход к решению рассматриваемой задачи. Был обоснован выбор минимальной температурной разности в теплообменном оборудовании 12 °C и спроектирована сеть теплообменного оборудования, реализующая максимальную рекуперации тепла.

3. Оптимизация сети теплообменников позволила уменьшить капитальные затраты при незначительном увеличении мощности потребляемых горячих утилит – греющего пара.

4. Экономическая оценка разработанного проекта сети при использовании пластинчатых теплообменников, показала, что срок его окупаемости составит около двух месяцев.

Список литературы

1. Hasurkar A., Malabade R., Vasudevan A., Chaudhary M., Khanwalkar P. Optimization of Heat Energy Network in a Boiler System Using Pinch Technology. *Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, 2013. Vol.1, №5, – pp. 9–12.
2. Ahmetovich E., Suljkanovich M., Kravanjab Z., Marechal F., Ibrica N., Kermanic M., Bogatajb M., Chuchek L. Simultaneous Optimization of Multiple-Effect Evaporation Systems and Heat Exchanger Network. *Chemical engineering transactions*, 2017, 61, – pp. 1399–1404.
3. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko E., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams integration in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 3/8 (93), – pp. 52–58.
4. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов / Харьков. НТУ «ХПИ». 2000, – 458 с.

5. Kemp I.C. Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy / Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 2007, – 396 p.
6. Introduction to Pinch Technology. Linnhoff March. Targeting House, Gadbrook Park, Northwich, Cheshire CW9 7UZ, England, 1998, – 63 p.
7. <https://economics.unian.ua/industry/10243512-gaz-dlya-promislovosti-podorozhchaye-z-veresnya.html>

References (transliterated)

1. Hasurkar A., Malabade R., Vasudevan A., Chaudhary M., Khanwalkar P. Optimization of Heat Energy Network in a Boiler System Using Pinch Technology. *Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, 2013. Vol.1, No.5. – pp. 9–12.
2. Ahmetovich E., Suljkanovich M., Kravanjab Z., Marechal F., Ibrica N., Kermanic M., Bogatajb M., Chuchek L. Simultaneous Optimization of Multiple-Effect Evaporation Systems and Heat Exchanger Network. *Chemical engineering transactions*, 2017, 61, – pp. 1399–1404.
3. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko E., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams integration in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 3/8 (93), – pp. 52–58.
4. Smit R., Klemesh, Y., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.A., Ulyev, L.M. *Osnovy integratsii teplovykh protsessov / Kharkov. NTU «KhPI»*. 2000, – 458 p.
5. Kemp I.C. Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy / Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 2006, – 396 p.
6. Introduction to Pinch Technology. Linnhoff March. Targeting House, Gadbrook Park, Northwich, Cheshire CW9 7UZ, England, 1998, – 63 p.
7. <https://economics.unian.ua/industry/10243512-gaz-dlya-promislovosti-podorozhchaye-z-veresnya.html>

Надійшла (received) 17.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бабак Тетяна Геннадіївна (Бабак Татьяна Геннадиевна, Babak Tatiana Gennadiivna) – доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2944-5110>; e-mail: tgababak@gmail.com

Биканов Сергій Миколайович (Быканов Сергей Николаевич, Bykanov Serhii Mykolaiovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7642-9415>; e-mail: sergiobyk1980@gmail.com

Соловей Людмила Валентинівна (Соловей Людмила Валентиновна, Solovey Ludmila Valentynivna) – ст. викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5308-6782>; e-mail: ludsol@ukr.net

Ус Вячеслав Анатолійович (Ус Вячеслав Анатольевич, Us Viacheslav Anatoliiovych) – магістр кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-346X>, e-mail: slavik270597@gmail.com